

EXCITATION OF NUCLEAR STATES BY POSITRON ANNIHILATION (陽電子消滅による核状態の励起)

著者	渡邊 芳久
号	707
発行年	1982
URL	http://hdl.handle.net/10097/24556

氏名・(本籍)	わた 渡 なべ 邊 よし 芳 ひさ 久
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 第 7 0 7 号
学位授与年月日	昭 和 57 年 10 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭和52年 3 月 京都大学大学院工学研究科 (修士課程) 原子核工学専攻修了
学位論文題目	EXCITATION OF NUCLEAR STATES BY POSITRON ANNIHILATION (陽電子消滅による核状態の励起)
論文審査委員	(主査) 教 授 北 垣 敏 男 教 授 藤 岡 学 助 教 授 宇 井 治 生

論 文 目 次

第 I 章 陽電子消滅

第 II 章 理論計算

第 III 章 実験手順

1. 実験原理
2. 陽電子線源
3. 線源強度
4. ターゲット
5. 陽電子照射
6. 誘導放射能の測定

第 IV 章 陽電子スペクトル

1. 陽電子のエネルギー分布
2. 測定
3. 結果と考察
4. ターゲットに入射する陽電子スペクトル
5. ターゲット中での陽電子スペクトル

第V章 結果と考察

1. 観測された γ 線スペクトル
2. 競合過程
3. 有効断面積 (σ_{eff})
4. 断面積 (σ)
5. 理論との比較
6. 結論

TABLE I

FIGURES 1—7

論文内容要旨

第 I 章 陽電子消滅

陽電子は電子と同じ質量で、正の電荷を有し、電子の反粒子である。一般に陽電子が電子と衝突すると、両粒子の全エネルギーに等しい電磁波を放出して両粒子は消滅する。この現象を陽電子消滅と呼ぶ。自由電子と運動エネルギーをほとんど失った陽電子とが消滅する場合、運動量とエネルギー保存法則から 2 本の 511keV γ 線を 180 度方向に放出する。しかし陽電子が原子核に強く束縛されている内殻電子と消滅する場合、特殊な消滅過程が可能となる。1 本の γ 線しか放出しない 1 光子消滅、 γ 線の代りに他の軌道電子を放出する無光子消滅、及び陽電子消滅による原子核の励起等である。この陽電子消滅による核励起は、陽電子が内殻電子と消滅した際に解放されるエネルギーが直接核に与えられ、核が光核励起反応のように共鳴吸収を行ない励起される現象である。この消滅過程の Feynman diagram を Fig.1 に示す。

本研究は、この原子核励起を伴う陽電子消滅過程の断面積を 3 種類の核種、 ^{115}In 、 ^{111}Cd 、及び ^{176}Lu について測定し、理論計算と比較することを目的とするものである。

第 II 章 理論計算

本研究では陽電子消滅による核励起過程の断面積を、現象が 2 段階に起ると考えて計算を行った。まず陽電子が内殻電子と消滅し光子を放出する、次に原子核がその光子を吸収し光核励起反応で励起する。この理論では断面積は

$$\sigma_{\text{ex}} = \sigma_{\text{aq}} \times \frac{\sigma_{\text{ph}}}{(2l+1)\pi k^{-2}}$$

となる。ここで σ_{aq} は陽電子消滅の断面積、 σ_{ph} は光核励起反応の断面積、 l は電磁波の多重極度、 k は電磁波の波数である。励起準位への遷移モードが E1, M1, 及び E2 の場合について σ_{aq} を計算した。その結果は

$$\sigma_{\text{aq}} = \pi\alpha^4 Z^3 (\xi+1)^{-9/2} (\xi-1)^{-1/2} (\xi^2+2\xi+3) \quad \text{E1}$$

$$\sigma_{\text{aq}} = \pi\alpha^4 Z^3 (\xi+1)^{-7/2} (\xi-1)^{1/2} \quad \text{M1}$$

$$\sigma_{\text{aq}} = \frac{8}{9}\pi\alpha^4 Z^3 (\xi+1)^{-11/2} (\xi-1)^{1/2} (\xi^2+\xi+3) \quad \text{E2}$$

である。これらは相対論的単位系で表わされており、 $\alpha=1/137$ 、 Z は物質の原子番号、 ξ は陽電子の全エネルギーを電子の静止質量エネルギーで測った無次元量である。 σ_{ph} については光核励起反応実験より得られる積分断面積を用いて

$$\int \sigma(E) dE = \frac{\pi}{2} \Gamma \sigma_{\text{ph}}$$

から求めた。ここで Γ は励起準位のレベル巾である。

第III章 実験手順

1. 実験原理

陽電子消滅による核励起の現象は、陽電子照射を行なったターゲットからの γ 線や内部転換電子(誘導放射能)を測定すれば、検出することが可能である。ほとんどの核種について、この現象は起り得ると考えられるが、通常原子核の励起状態の寿命が短いため、陽電子照射をしながら誘導放射能の測定をせざるを得ない。その場合、圧倒的多数の511keV 消滅 γ 線等により誘導放射能の測定が著しく困難になる。そこで励起状態が比較的長寿命の準安定状態を経て安定になる核種をターゲットとして選べば、陽電子照射をした後、準安定状態からの放射線を測定することにより、この現象を確認することができる。このような陽電子照射と誘導放射能の測定を分離する実験方法では、ターゲット核種が準安定状態を持つものに制限される。そのような核種の中から光核励起反応がよく研究され、しかもその断面積が比較的大きい ^{115}In 、 ^{111}Cd 、及び ^{176}Lu をターゲットとした。

2. 陽電子線源

陽電子線源として ^{64}Cu を用いた。この核種は天然銅に約70%含まれている ^{63}Cu が、熱中性子を吸収してできるものである。その崩壊図を Fig.2 に示す。直径20mm、厚さ0.3mmの天然銅箔を京都大学原子炉実験所の原子炉(KUR)で10時間以上中性子照射を行ない線源を作成した。

3. 線源強度

陽電子線源の強度は、 ^{64}Cu より放出される1.34MeV γ 線を線源が十分減衰してから、京都大学放射性同位元素総合センターにある掘場製75cc Ge(Li)検出器で測定した。その結果、約10.5 Ci から20Ci の ^{64}Cu が生成されていた。

4. ターゲット

ターゲット核種である ^{115}In 、 ^{111}Cd 、及び ^{176}Lu のレベル図を Fig.3 に示す。これらの核種の励起単位は、光核励起反応により調べられており ^{115}In では1078, 1464keV、 ^{111}Cd では1330keV、及び ^{176}Lu では1083keV である。また、いずれの核種も比較的長寿命の準安定状態を経て励起単位から基底状態へ遷移することが知られている。本実験では、直径20mmの天然金属箔を用いた。厚さはインジウムが396mg/cm²、カドミウムが435mg/cm²、及びルテチウムが523mg/cm²である。

5. 陽電子照射

陽電子照射はエネルギーを選別しない方法を用いた。陽電子消滅による核励起の現象は共鳴吸収の性格を持つため、共鳴エネルギーに一致するエネルギーに陽電子をあらかじめ選別しておいても、ターゲット中でのエネルギー損失により分布が変り、この現象に寄与できなくなるためである。またエネルギーを選別することにより、入射陽電子数が減少することも、実験上不利な点である。本実験では陽電子線源の格納を兼ねた鉛容器内で照射を行なった。照射容器を Fig.4 に示す。照射効率を良くするために線源とターゲットをほとんど密着させて照射した。

6. 誘導放射能の測定

誘導放射能の測定には γ 線と内部転換電子があるが、本実験では γ 線を測定した。これは内

部転換電子を測定する場合、ターゲット中での減速や減衰の評価が困難なためである。陽電子照射を行なったターゲットからの γ 線は75cc Ge(Li)検出器で測定した。その断面図を Fig.5 に示す。検出系の光子に対する検出効率を標準線源で求めた。また、測定前後に検出系の較正も標準線源で行なった。測定した γ 線のエネルギーは、 ^{115}In では336keV、 ^{111}Cd では245keV、及び ^{176}Lu では88.35keV である。

第IV章 陽電子スペクトル

陽電子消滅による核励起は、一種の原子核の共鳴現象と考えられるので、励起断面積を求めるには、入射陽電子のエネルギー分布を知る必要がある。このため同じ厚さの陽電子線源を作成し、京都大学原子炉実験所にある日立製セクタ形2重収れん β 線スペクトロメーターで運動量分布を測定した。結果を Fig.6 に示す。図中、点線は測定系の検出効率の補正を行なったものである。ターゲット内部での共鳴現象に寄与できる陽電子の分布は次のようにして求めた。ターゲットを薄層の重ね合せと考え、薄層を透過する陽電子のスペクトルを計算し、共鳴巾に入る陽電子の全個数に対する比を求め、次に GM 計数管で陽電子の吸収実験を行ない、薄層を透過する個数を測定した。この2つの量からターゲット内部での陽電子の分布を求めた。

第V章 結果と考察

1. 観測された γ 線スペクトル

Fig.7 の1-3は陽電子照射を行なったターゲットから放出された γ 線のスペクトルである。 ^{115}In と ^{111}Cd の場合は γ 線で照射した時の光核励起反応による結果も示した。 ^{115}In と ^{176}Lu の場合、陽電子照射により準安定状態からの γ 線が検出された。ところが ^{111}Cd については、統計が悪く明確なピークは認められなかった。しかしピーク付近では明らかにバックグラウンドより高い計数値が得られた。

2. 競合過程

断面積を計算する前に競合過程の影響を調べた。競合過程としては(I)photoexcitation と (II)electroexcitation に大別できる。(I)では、(a)511keV 消滅 γ 線、(b)annihilation in flight で放出される γ 線、(c)1光子消滅の γ 線、(d)線源よりの1.34MeV γ 線、(e)1.34MeV レベルからの内部転換電子による制動 X 線、及び(f)天然の γ 線を検討した。(II)では、(g)入射陽電子、(h) (a)~(f)に伴う2次電子、(i)1.34MeV レベルからの内部転換電子、及び(j)無光子消滅からの軌道電子について評価した。これらすべての過程について検討した結果、得られた誘導放射能に対する影響は、すべての場合について無視できることがわかった。

3. 有効断面積(σ_{eff})

有効断面積は次式で与えられ、全入射陽電子に対し定義されるもので、共鳴レベル巾のことは考慮に入れていない。

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{C_\gamma(1+\alpha)(\lambda_2 - \lambda_1)\exp(\lambda_2 t_s)}{N_0 n_p \varepsilon R [1 - \exp(-\lambda_2 t_m)] [\exp(-\lambda_1 t_r) - \exp(-\lambda_2 t_r)]} ,$$

ここで C_γ は観測された光子数, N_0 は単位面積あたりのターゲット核種の個数, n_p は単位時間あたりに入射する陽電子数, ε は検出効率, R は観測される光子の放出割合, α は内部転換係数, λ_1 は陽電子線源の崩壊定数, λ_2 は準安定状態の崩壊定数, t_m は測定時間, t_r は照射時間, 及び t_s は照射終了から測定開始までの時間である。

実験の結果は

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{eff}} &= (1.9 \pm 0.5) \times 10^{-31} \text{cm}^2 && \text{for } ^{115}\text{In} \\ \sigma_{\text{eff}} &= (4.8 \pm 2.8) \times 10^{-32} \text{cm}^2 && \text{for } ^{111}\text{Cd} \\ \sigma_{\text{eff}} &= (2.6 \pm 0.9) \times 10^{-29} \text{cm}^2 && \text{for } ^{176}\text{Lu} \end{aligned}$$

である。

4. 断面積(σ)

断面積 σ は共鳴吸収反応に寄与できる陽電子に対してのみ定義されるもので、有効断面積とは

$$\sigma_{\text{eff}} = n\sigma \times \Gamma_{\text{iso}} / \Gamma$$

の関係である。ここで $\Gamma_{\text{iso}} / \Gamma$ は励起準位から準安定状態を経て基底状態へ遷移する分岐比である。 n は、全入射陽電子数に対する、共鳴レベル中に存在する陽電子数の比である。得られた結果を Table I に示す。第II章で計算された理論値も併せて示した。

5. 理論との比較

Table I が示すように、 ^{111}Cd の場合を除いて、すべて実験値の方が理論値より約 10^3 大きい。この不一致について考察した。大きな原因として次の3点が考えられる。(1)理論モデルの不十分性。2段階過程の計算方法に問題がある。(2)入射陽電子の非弾性過程の影響。理論計算では無視しているが、陽電子の運動エネルギーが光子や軌道電子を放出して減少した後消滅し、核を励起する過程である。その断面積は共鳴過程のものの 10^{-2} としても、可能なエネルギー範囲が広いと積分すると無視できない量となる。(3)ターゲット内部での陽電子分布の評価。理想的には輸送方程式を解くかモンテカルロ法で計算するべきだが、本研究では透過スペクトルの重ね合せて近似した。

ところで ^{111}Cd の場合、実験値と理論値がたまたま合っているのは理論計算で E1 吸収としたためであろう。M1 か E2 と仮定すれば理論値は約 $5 \times 10^{-26} \text{cm}^2$ となる。むしろ本実験の結果から推測すると ^{111}Cd の励起準位への遷移は M1 か E2 の可能性が高い。

6. 結 論

陽電子が核に束縛されている電子と消滅し、核が励起される過程を3種類の核種、 ^{115}In , ^{111}Cd 及び ^{176}Lu について実験的に確認し断面積を求めた。その結果、 ^{115}In の 1078-keV 準位に対し

$(3.9 \pm 1.4) \times 10^{-24} \text{cm}^2$, 1464-keV 準位に対し $(1.4 \pm 0.5) \times 10^{-22} \text{cm}^2$, 及び ^{176}Lu の 1083-keV 準位に対し $(9.0 \pm 3.2) \times 10^{-22} \text{cm}^2$ を得た。 ^{111}Cd の場合は統計が悪いため断面積の上限として $8.6 \times 10^{-25} \text{cm}^2$ を得た。

Table I Cross sections for nuclear excitation by positron annihilation

Nuclide	Level (keV)	Cross section (cm^2)	Theoretical value (cm^2)
^{115}In	1078	$(3.9 \pm 1.4) \times 10^{-24}$	3.7×10^{-27} E2
	1464	$(1.4 \pm 0.5) \times 10^{-22}$	1.3×10^{-25} M1
^{111}Cd	1330	$< 8.6 \times 10^{-25}$	2.6×10^{-25} E1
^{176}Lu	1083	$(9.0 \pm 3.2) \times 10^{-22}$	1.2×10^{-24} E2

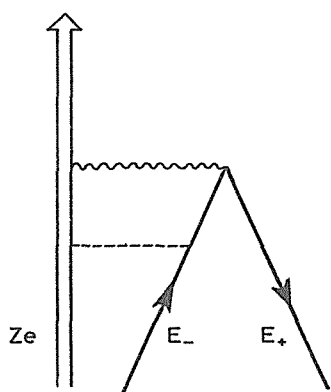


Fig. 1 Feynman diagram for nuclear excitation by positron annihilation.

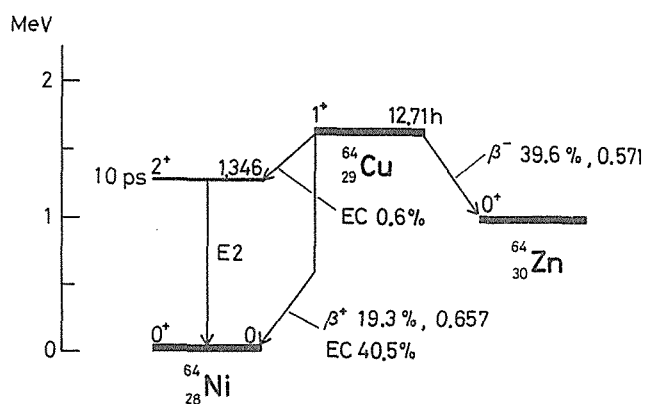


Fig. 2 Partial decay scheme of ^{64}Cu .

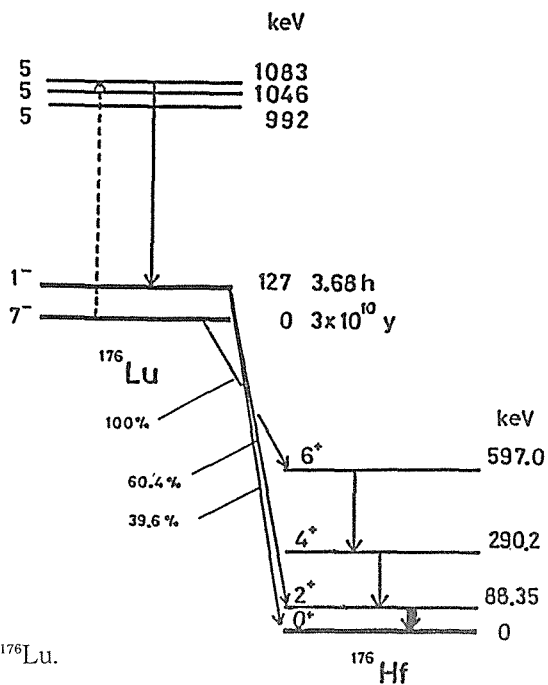
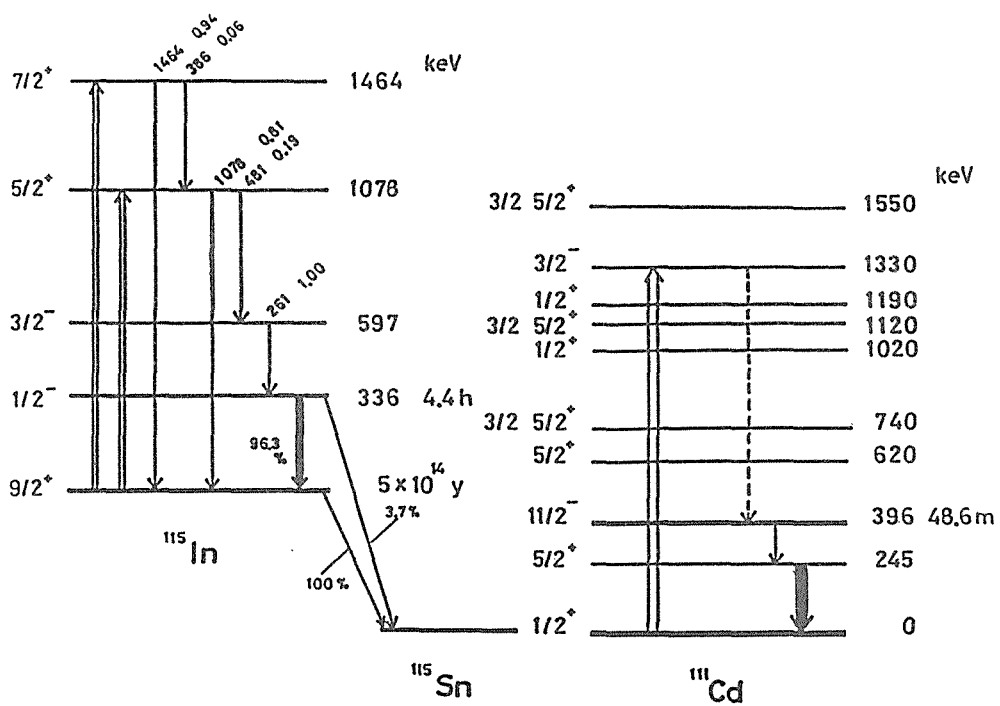


Fig. 3

Partial level schemes of ^{115}In , ^{111}Cd , and ^{176}Lu .

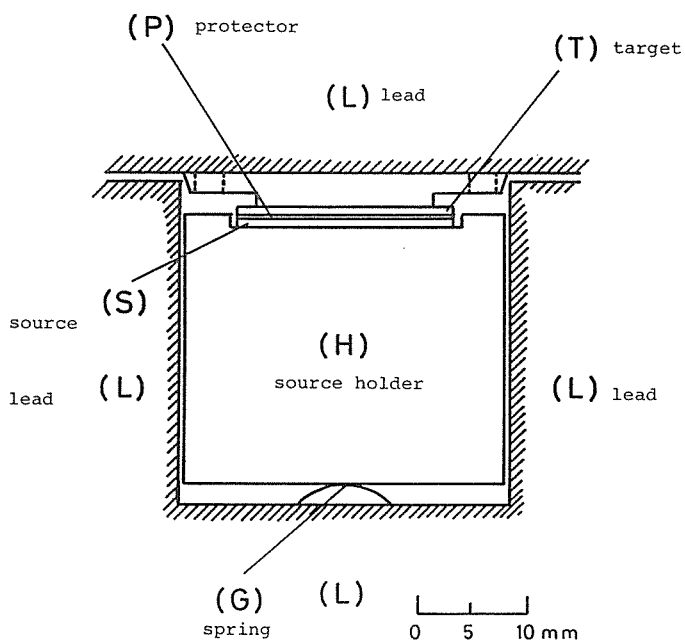


Fig. 4 Arrangement for positron irradiation.

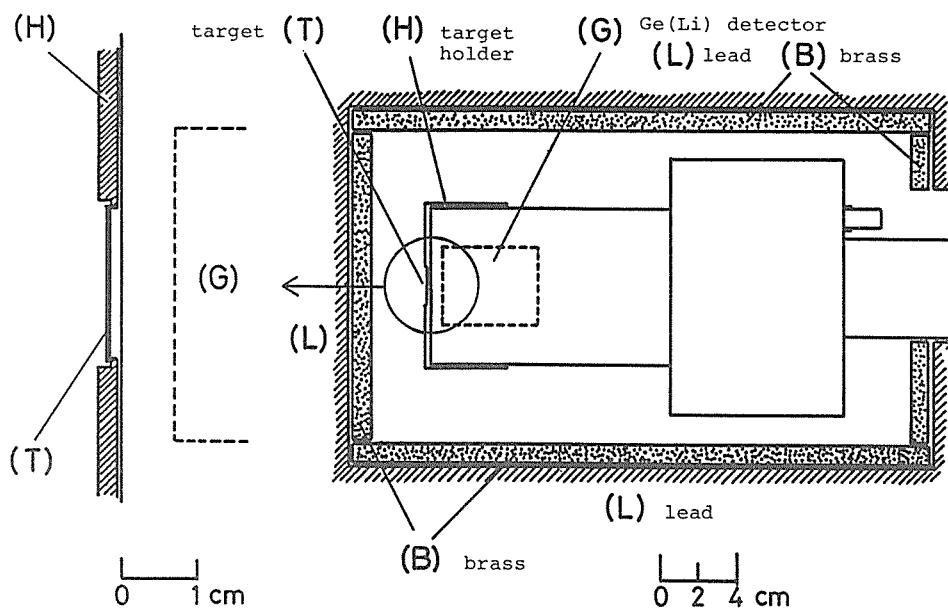


Fig. 5 Arrangement for measurements of induced activity.

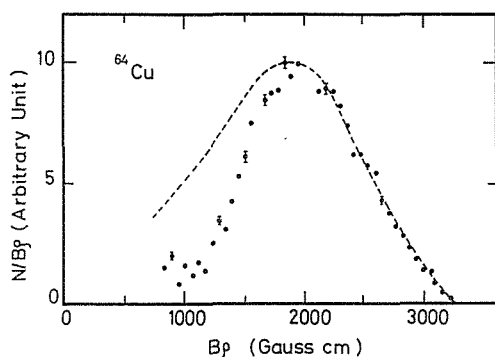


Fig. 6 Momentum spectrum of positrons from ^{64}Cu .

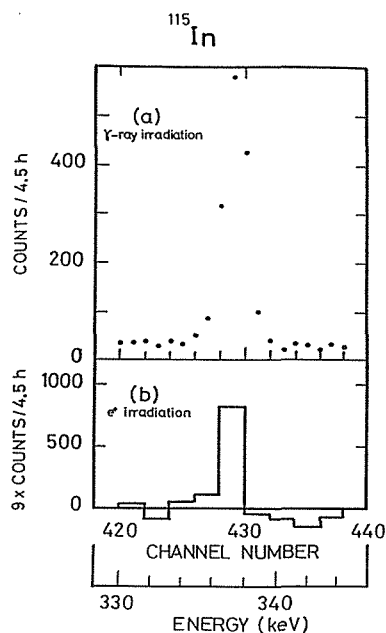


Fig. 7-1 Observed energy spectra of γ rays from natural indium foil.

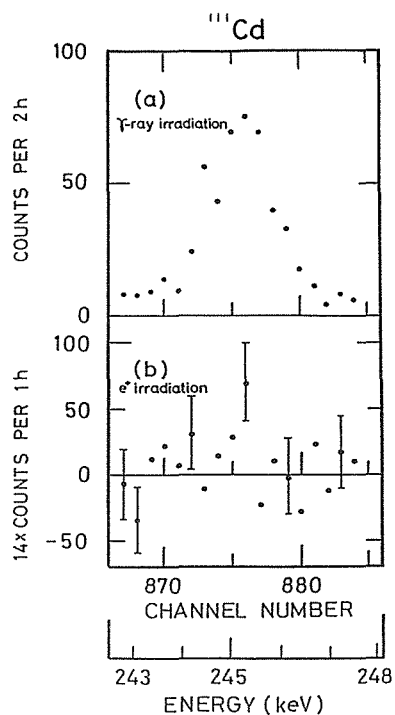


Fig. 7-2 Observed energy spectra of γ rays from natural cadmium foil.

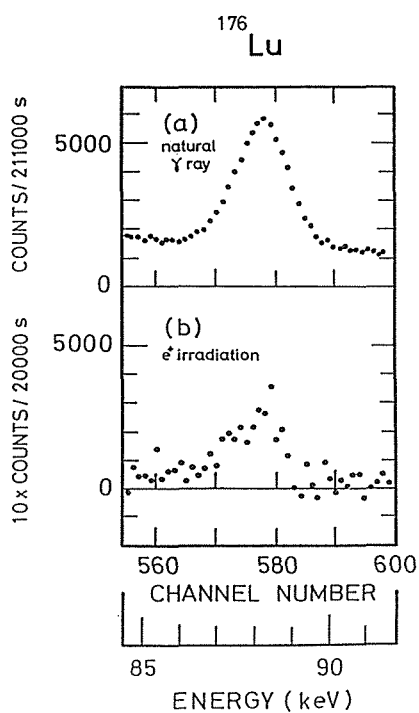


Fig. 7-3 Observed energy spectra of γ rays from natural lutetium foil.

論文審査の結果の要旨

渡邊芳久提出の論文は、陽電子-内殻電子消滅により、原子核が励起される過程を始めて組織的に研究したものである。論文は5章よりなる。

第I章は、陽電子-電子消滅の種々の過程を論じたものである。極めて低エネルギーの陽電子が自由電子と消滅する場合は、いわゆる2光子消滅で、系の全エネルギーの $2 m_e c^2$ が2個の光となって放出される。しかし、原子核に束縛されている内殻電子との消滅においては、1光子消滅あるいは0光子消滅等も可能となり、更に0光子消滅で且原子核の共鳴励起を起す過程が考えられる。本研究は、この核励起過程の存在を実験的に測定証明したものである。

第II章は、この陽電子-電子消滅による原子核励起過程の断面積を理論的に計算したもので、陽電子-電子消滅による光子放出と原子核の光子吸収による励起の2段階モデルを用い、E1, M1, E2の各光子吸収モードに対して断面積を求めた。

第III章は、実験の詳細を述べたものである。実験方法としては、陽電子照射によって生じた核励起状態より、長寿命の準安定状態を経て安定となるような核種を選び、準安定状態からの誘導放射能を測定することにより過程を測定する。選ばれたターゲット核種は ^{115}In , ^{111}Cd 及び ^{176}Lu である。陽電子線源としては、京都大学原子炉を用いて作った ^{64}Cu を用い、陽電子照射後の誘導放射能の測定は、京都大学ラジオアイソトープセンターの Ge(Li) 測定器を用いて行なわれた。

第IV章は、ターゲット内の各深さにおける陽電子の数、並びにエネルギー分布の測定及び計算であるが、これにより原子核の共鳴励起に関与した陽電子の数が与えられる。

第V章は、結果並びに検討である。断面積の実験値として次の値を得た。

^{115}In	1078keV レベル	$(3.9 \pm 1.4) \times 10^{-24} \text{cm}^2$
	1464	$(1.4 \pm 0.5) \times 10^{-22}$
^{111}Cd	1330	$< 8.6 \times 10^{-25}$
^{176}Lu	1083	$(9.0 \pm 3.2) \times 10^{-22}$

また、競合過程によるバックグラウンドは無視し得ることを示した。この実験値は、2段階モデルによる理論値よりほぼ3桁大きいが、これは現在の理論的取扱が不完全であることを示しているものと考えられる。

以上、本研究は、誠に巧妙とも言い得る実験方法により、陽電子-内殻電子消滅による原子核励起過程を組織的に実証し、3種の核種についてその断面積を示したものであって、原子核研究分野における重要な新知見を与えたものである。よって、渡邊芳久提出の論文は、理学博士の論文として合格と認める。